

DOI: 10.5604/01.3001.0010.7265

BADANIA OPLYWU WYBRANYCH PROFILI SOND DLA POTRZEB W METROLOGII STRUMIENI

Piotr Zgolak

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki wizualizacji opływów wybranych profili sond spiętrzających przepływ. Określono częstotliwość odrywania się wirów za sondą. Przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych mających na celu określenie oraz analizę zjawisk zachodzących w rozpatrywanym obszarze badawczym. Dzięki wykorzystaniu metody anemometrii obrazowej uzyskano rozkłady prędkości w otoczeniu badanych profili. Sformułowano wnioski natury metrologicznej.

Słowa kluczowe: cyfrowe kamery do zdjęć, pomiar przepływu płynu, pomiar prędkości, dynamika płynów

RESEARCH OF FLOW AROUND SELECTED SENSORS PROFILES FOR METROLOGY FLOWS

Abstract. The paper presents results of flow around visualization in selected sensors profiles of the pitot probe. Vortices detachment frequency from the probe was defined. A series of experimental research to identifying and determining analysis the phenomena occurring in the area of research were done. By using Particle Image Velocimetry methods (PIV) velocity distribution around the analyzed profiles were obtained. Metrological type conclusions were formulated.

Keywords: imaging digital cameras, fluid flow measurement, velocity measurement, fluid dynamics

Wstęp

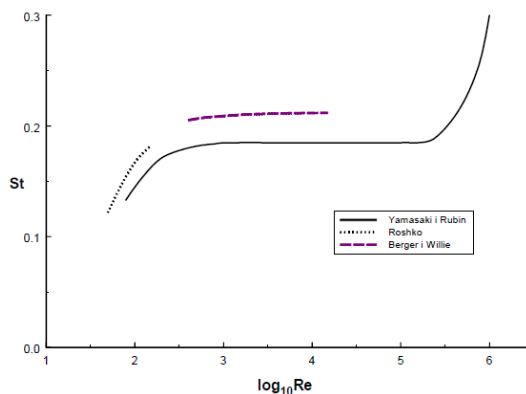
Spośród różnych typów przepływomierzy istotną rolę odgrywają przepływomierze z sondami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne. Konstrukcje znane od lat, są obecnie często stosowane dzięki możliwości precyzyjnych pomiarów różnic ciśnień. Mierzona różnica ciśnień w wybranych miejscach na ścianach sondy umożliwia związanie jego wartości ze strumieniem masy. Dzięki łatwości montażu i względnie małej masie przepływomierze te stosowane są często w rurociągach o dużych średnicach.

Jednym z problemów jaki się pojawia podczas eksploatacji są drgania sond. Spowodowane są okresowo generowanymi przez nie wirami. Jeśli częstotliwość ich generacji jest bliska częstotliwości drgań własnych przepływomierza, łatwo może on zostać uszkodzony. Stąd też informacje o częstotliwości odrywania wirów w przypadku różnych profili sond ma istotne znaczenie praktyczne.

Pierwsze badania zostały prowadzone nad wyżej wymienionym problemem, zostały opublikowane w roku 1911 przez von Karmana, który zajmował się badaniem generacji wirów [3]. Sformułował on wniosek, iż generacja wirów ma charakter regularny, a częstotliwość ich powstawania można zapisać równaniem:

$$f = S_T \frac{w}{d} \quad (1)$$

gdzie: d – wymiar charakterystyczny dla przeszkody [m], w – prędkość przepływającego płynu [m/s], S_T – liczba Strouhala (liczba kryterialna podobieństwa w warunkach ruchu nieustalonym).

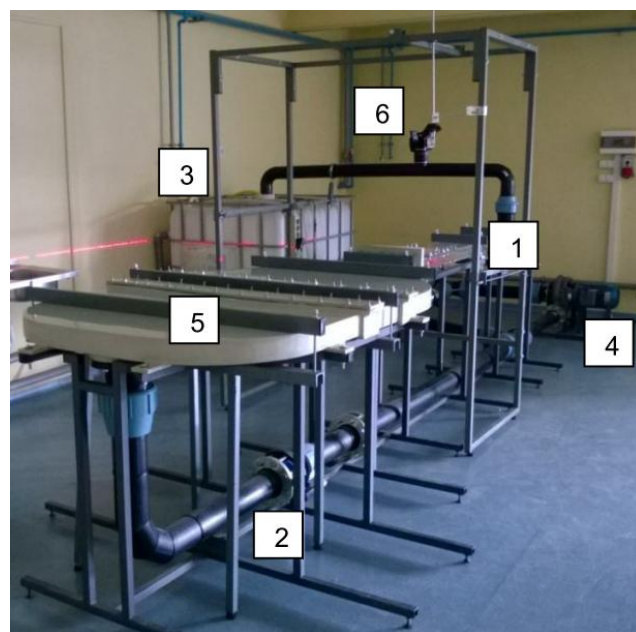


Rys. 1. Zależność liczby Strouhala od liczby Reynoldsa [5]

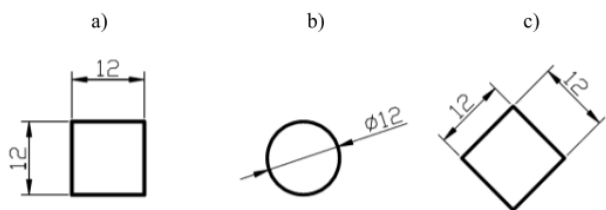
Ważnym parametrem tego zjawiska jest fakt, iż częstotliwość wirów generowanych na przeszkodzie nie zależy od właściwości fizycznych płynu, a jedynie od jego prędkości. Zatem wynik pomiaru prędkości nie zależy od takich parametrów jak np. temperatura, czy skład chemiczny medium [1]. Wyrażenie (1) posiada decydujący wpływ na liniowość zjawiska, którego ma stałą wartość liczby S_T . Równanie jest zależne od prędkości przepływu oraz lepkości płynu, którym była przedmiotem wielu badań opisanych w publikacjach. Przedstawiono także, iż liczba Strouhala jest niezmienna w bardzo szerokim zakresie liczb Reynoldsa. Wyraźnie przedstawiono na rysunku 1 zależność liczby Strouhala od liczby Reynoldsa zaczerpnięto z literatury Yamasaki i Rubina dla opływu walca [5].

1. Stanowisko i procedura badawcza

Stanowisko, którego zdjęcie przedstawiono poniżej (rys. 2), składa się z przezroczystego tunelu wodnego (1) połączonego zespołem rurociągów (2) ze zbiornikiem (3), pompą (4) i prostownicą strumienia (5). W tunelu umieszcza się badane sondy (rys. 3), dla których prowadzone są badania (6) [7].



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe do badań opływu wybranych profili sond

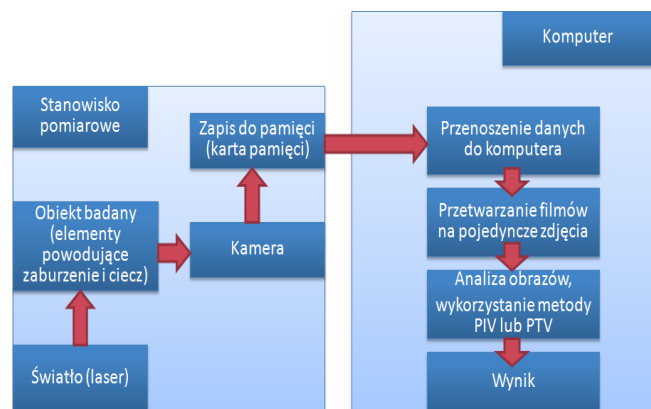


Rys. 3. Badane profile o podstawie: a) kwadratu, b) koła, c) kwadratu obróconego pod kątem 45°

Przy pomocy kamery Nikon D5100 prowadzono rejestrację zmian zachodzących w płynie podczas przepływu płynu w analizowanym obszarze. Źródłem światła zastosowanym podczas badań były lasery liniowe koloru czerwonego, które przestrzeń pomiarową przecinały światłem w postaci noża świetlnego.

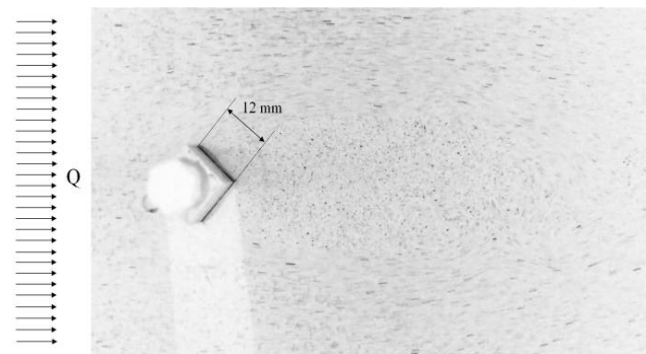
W badaniach zastosowano znaczniki z tworzywa sztucznego (Poliamid) o gęstości zbliżonej do wody i granulacji od 0,1 do 1 mm. Znaczniki koloru czarnego posiadają powierzchnię gładką. Powierzchnia tego materiału umożliwia na odbicie światła w kierunku kamery. Podczas badań wykorzystano wodę jako medium przepływowe.

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg czynności wykonywania badań doświadczalnych oraz analizy wyników w zależności od stosowania dostępnych metod. Uzyskane obrazy wykorzystano do analizy przy metodzie anemometrii obrazowej (z j. angielskiego *Practicle Image Velocimetry* – PIV).



Rys. 4. Schemat ideowy procesu realizacji przebiegu badań i opracowywania wyników

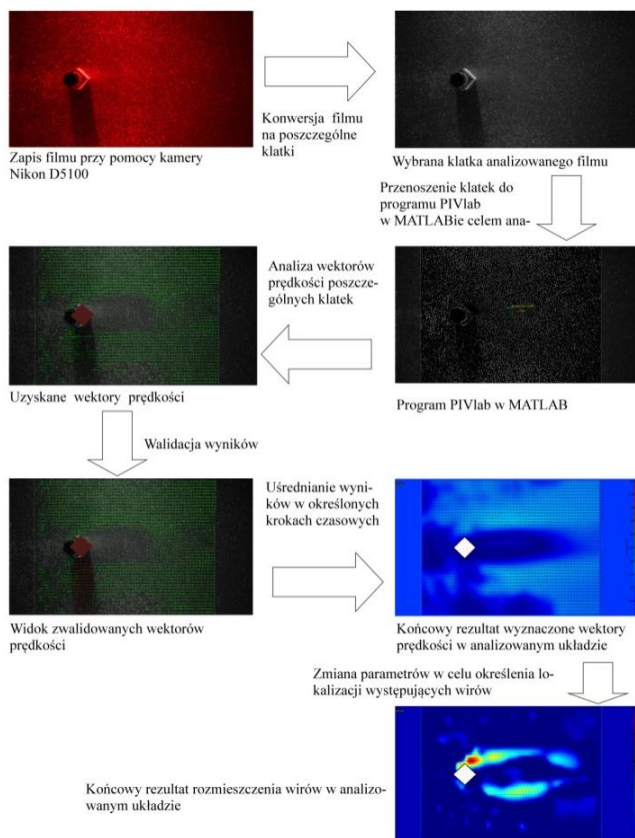
Na rysunku 5 przedstawiono zdjęcie i wielkość analizowanego obszaru oraz umiejscowienie wybranych profili sond [8]. Przedstawiono poglądowy widok z punktu widzenia kamery i kierunku przepływu płynu wody wraz ze znacznikami. Dzięki zastosowanej kamerze zarejestrowano obraz o wysokiej jakości (Full HD) o rozmiarze obrazu 1920×1080 pikseli i prędkości 25 klat/s. Wymiary analizowanego obszaru wynoszą 0,18 m na 0,1 m.



Rys. 5. Podglądowy widok analizowanego profilu i kierunku przepływu płynu

W programie PIVlab pomniejszono obszar analizowany do wymiaru 1280×1080 pikseli (0,13 m na 0,1 m) w celu uniknięcia mocno występowania cienia, lub słabo doświetlonych miejscach, w których mogą występować błędne wartości. Do analizy wykorzystano, przy wyznaczaniu wektorów prędkości szybkiej transformacji Fouriera (FFT) [6]. W tej metodzie wykorzystano powierzchnię fragmentów zdjęć o wymiarach 48×48 pikseli do wyznaczania kierunków i wielkości przesunięcia wektorów prędkości w analizowanych obrazach.

Na (rys. 6) przedstawiono schemat postępowania w programie PIVlab. Wyniki uzyskano przy pomocy omawianego programu, który został napisany w programie MATLAB przez autorów: dr William Thielicke i prof. dr Eize J. Stamhuis [4].



Rys. 6. Kolejność wykonywania analizy wyników od momentu zapisu filmu w kamerze do uzyskania wyników badań eksperymentalnych

2. Wyniki

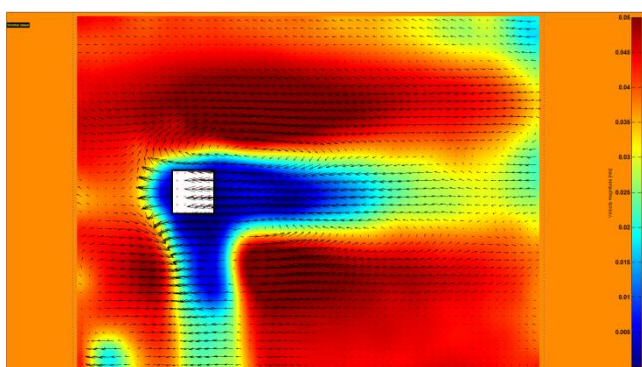
Podczas przeprowadzonych badań zastosowano dwa różne strumienie płynu podczas opływu omawianych profili sond. Dzięki metodzie PIV wygenerowano składowe wektory prędkości, kierunek wektorów prędkości, wartość wektorów oraz lokalizacje wirów za badany element. Poniżej w podrozdziałach są omawiane uśrednione prędkości oraz lokalizacje wirów powstałych za przeszkodą. Dzięki metodzie PIV wygenerowano wartości prędkości uśrednionych przepływu płynu w tunelu w granicach od 0,032 do 0,043 m/s dla pierwszego zakresu strumieni i od 0,0071 do 0,013 m/s dla drugiego przedziału przepływu cieczy. Wyniki przedstawione poniżej zostały zsumowane i uśrednione z krokiem czasowym do 8 sekund.

2.1. Rozkład prędkości w analizowanych obszarach

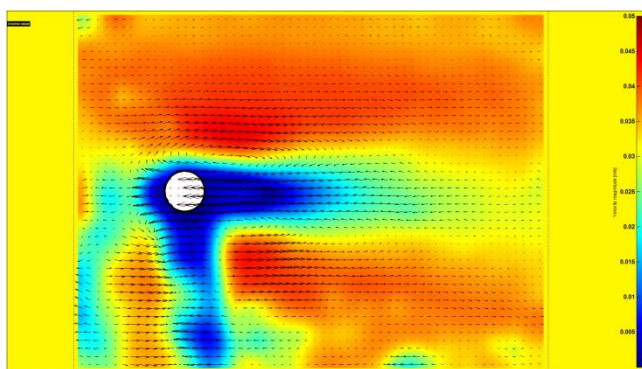
Na rysunkach 7–9 przedstawiono rozkłady wektorów prędkości w analizowanym obszarze dla pierwszego zakresu przepływu cieczy. Zauważono, iż w każdym rozkładzie prędkości występują pewne asymetrie. W tych miejscach były gorzej doświetlone, przez to powstało mniejsze wartości prędkości lub inny kierunek wektorów [2]. Kształty badanych profili wpływały

na występowanie cieni. Powodem występowania w miejscach niedoświetlonych są profile, którego przez nie światło zostało zatrzymane lub uległo odbiciu w innym kierunku. Na tych rozkładach wektorów prędkości uzyskanych za pomocą metody PIV omawianą „cienią” są nieco szersze od średnicy walca lub szerokości boku podstawy kwadratu. W przypadku prostopadłościąnu o podstawie kwadratu obróconego pod kątem 45° jest to przekątna kwadratu.

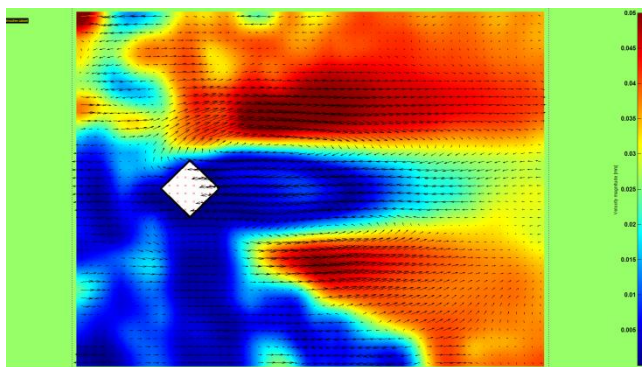
Jak widać na rysunkach 7, 8 i 9 różne kształty elementów mają istotny wpływ na rozkład prędkości przepływu płynu w analizowanych obszarach. Na rysunku 7 przedstawiono za elementem, w odległości 4 krotności szerokości boku następujące wyrównanie rozkładu prędkości. W przypadku wyrównania profilu prędkości znajdującego na rysunku nr 9 jest podobnie jak w rysunku 7. Różnica jest taka, że dla wartości krotności 4 przekątnej podstawy graniastosłupa czworokątnego obróconego pod kątem 45° . Na rysunku 8 przedstawiono mniejszy rozkład prędkości za elementem niż na rysunkach 7 i 9. Ten profil wektorów prędkości dopiero wyrówna się w odległości 5 średnic walca.



Rys. 7. Rozkład wektorów prędkości analizowanego obszaru opływu dla sondy o przekroju kwadratu



Rys. 8. Rozkład wektorów prędkości analizowanego obszaru opływu dla sondy o przekroju cylindrycznym

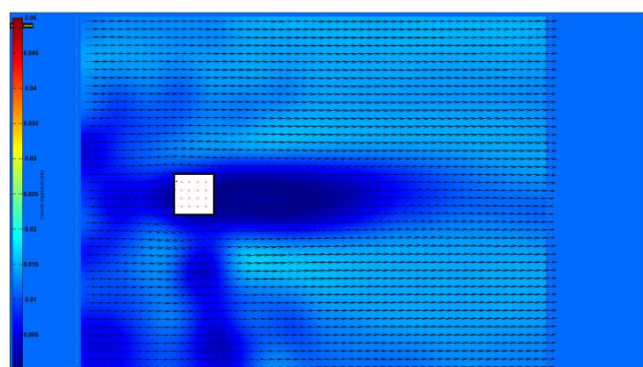


Rys. 9. Rozkład wektorów prędkości analizowanego obszaru opływu dla sondy o przekroju kwadratu obróconego pod kątem 45°

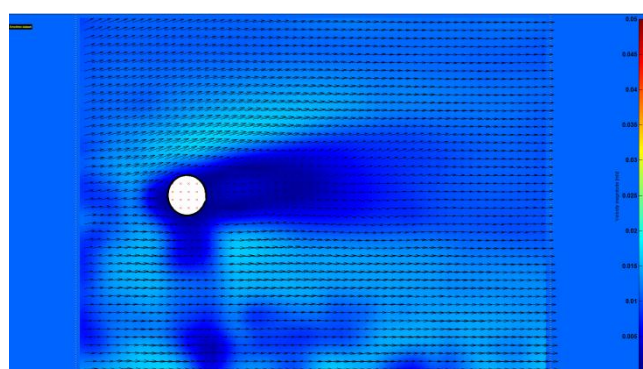
Na rysunkach 10–12 przedstawiono rozkład wektorów prędkości w analizowanym obszarze dla drugiego strumienia wody. Można zauważyć, iż w każdym rozkładach prędkości występują podobne asymetrie jak w przypadku pierwszego zakresu strugi cieczy. Jak widać na rysunkach 10, 11 i 12 istotny wpływ mają różne kształty elementów na rozkład prędkości przepływu płynu w analizowanych obszarach. Na rysunku 10 za elementem o podstawie kwadratu w pewnej odległości następuje szybsze wyrównanie prędkości niż w przypadku elementu znajdującego na rysunku nr 12.

Zauważono również, że rozkład wektorów prędkości dla profili o podstawie kwadratu (rys. 7 i 10), są bardzo podobne. Jedyną różnicą pomiędzy nimi jest wartość prędkości. Podobnie również wygląda sytuacja na pozostałych rysunkach.

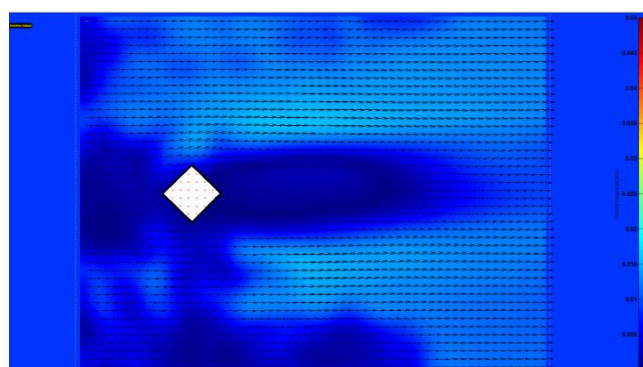
Na rysunkach 9 i 12 przedstawiono większe obszary wektorów prędkości równej 0 lub są skierowane w przeciwnym kierunku, spowodowane tym, że zostało słabo doświetlone w tym obszarze lub powstał większy cień. Dlatego program PIVlab nie wykonał prawidłowej analizy na tym fragmencie obszaru.



Rys. 10. Rozkład wektorów prędkości analizowanego obszaru opływu dla sondy o podstawie kwadratu



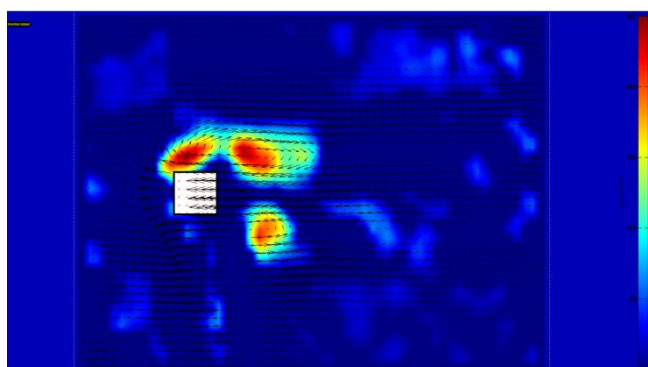
Rys. 11. Rozkład wektorów prędkości analizowanego obszaru opływu dla sondy o kształcie cylindrycznym



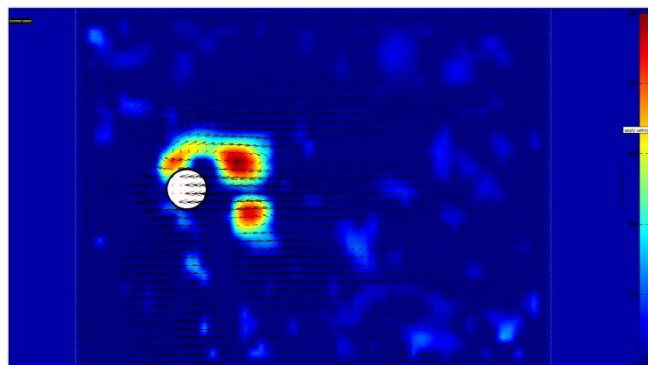
Rys. 12. Rozkład wektorów prędkości analizowanego obszaru opływu dla sondy o podstawie kwadratu obróconego pod kątem 45°

2.2. Lokalizacje wirów powstałych za profilami sond

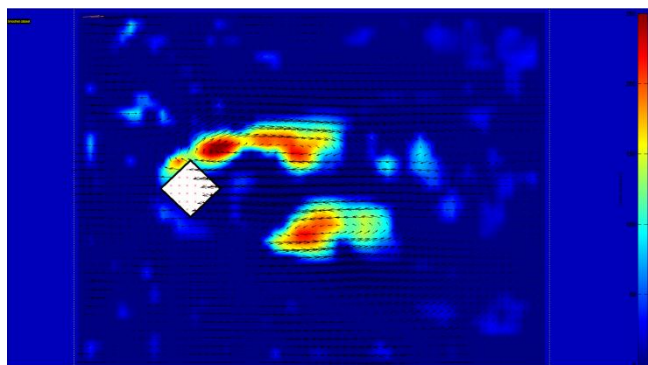
Na rysunkach 13–15 przedstawiono lokalizację wirów uśrednionych w analizowanym obszarze dla pierwszego zakresu przepływu cieczy. Natomiast na kolejnych rysunkach 16–18 przedstawiono lokalizacje wirów dla drugiego zakresu strumieni. Zauważono, iż na rysunkach 13 i 16, wielkość i kształt powstawania wirów za prostopadłością są bardzo zbliżone do siebie pomimo to, że są różne prędkości przepływu. Kształty powstawania wirów na rysunkach 14 i 17 są bardzo podobne dla opływu walca. Podobnie również występuje na rysunkach 15 i 18 dla prostopadłością o podstawie kwadratu obróconego pod kątem 45° . Na wielkość i kształt powstawania tych wirów wpływają kształty opływanych profili sond. Te kształty mają wspólny wymiar 12 mm. Ostatni z badanych profili był to kwadrat obrócony pod kątem 45° zauważono, że wiry pojawiają się w innych miejscach niż w przypadku kwadratu o ustawieniu prostopadłym do kierunku przepływu.



Rys. 13. Lokalizacja wirów powstałych za opływającą sondą o podstawie kwadratu



Rys. 14. Lokalizacja wirów powstałych za opływającą sondą o kształcie cylindrycznym



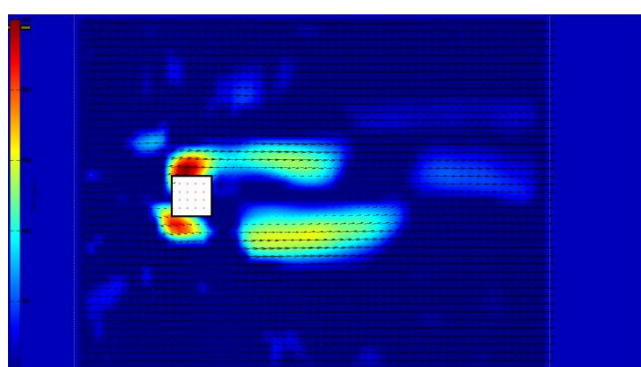
Rys. 15. Lokalizacja wirów powstałych za opływającą sondą o podstawie kwadratu obróconego pod kątem 45°

Wyznaczono również wartość częstotliwości powstawania wirów za elementem zaburzającym. Ta wartość jest parametrem do wyznaczania liczby Strouhala. Przez ten parametr można uzyskać charakterystykę dla poszczególnych profili. Zauważono, iż niezależnie od prędkości przepływu, które były badane, kształt i wielkość wirów jest taka sama lub są bardzo zbliżone. Dla przepływu zakresu pierwszego uzyskano następujące czasy generacji wirów:

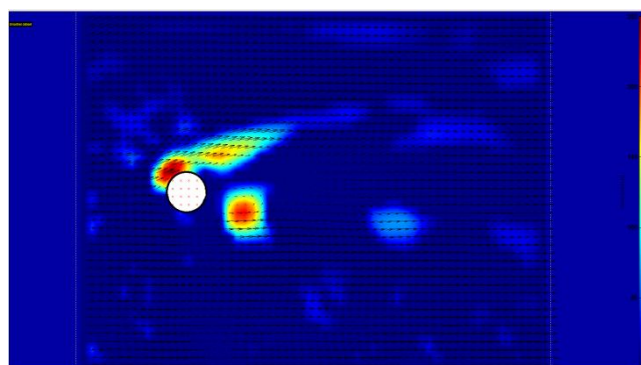
- dla sondy o przekroju kwadratu – 1,28 s,
- dla sondy o przekroju walca – 1,6 s,
- dla sondy o przekroju kwadratu obróconego pod kątem 45° – 1,09 s.

W przypadku dla drugiego zakresu przepływu uzyskano następujące czasy generacji wirów opływanych elementów:

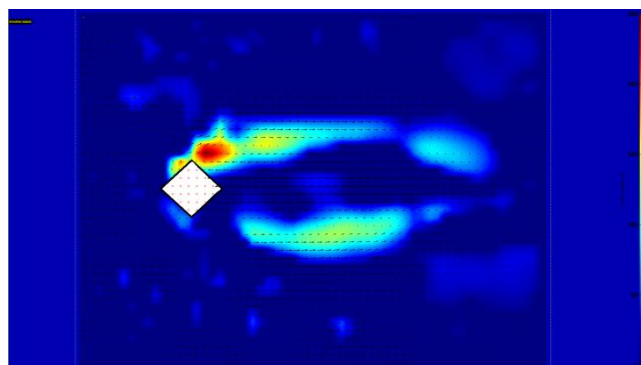
- dla sondy o podstawie kwadratu – 4,25 s,
- dla sondy o kształcie walca – 4,03 s,
- dla sondy o podstawie kwadratu obróconego pod kątem 45° – 6,32 s.



Rys. 16. Lokalizacja wirów powstałych za sondą o podstawie kwadratu



Rys. 17. Lokalizacja wirów powstałych za opływającą sondą o kształcie cylindrycznym



Rys. 18. Lokalizacja wirów powstałych za opływającą sondą o podstawie kwadratu obróconego pod kątem 45°

Zauważono podczas analizy wyników, że kształt profili znacznie wpływają na czas oderwania wirów od krawędzi elementów badanych sond. Występuje bardzo wyraźna zbieżność pomiędzy czasem oderwania dla I przedziału przepływu, a II zakresu dla sondy o przekroju kwadratu obróconego pod kątem 45°.

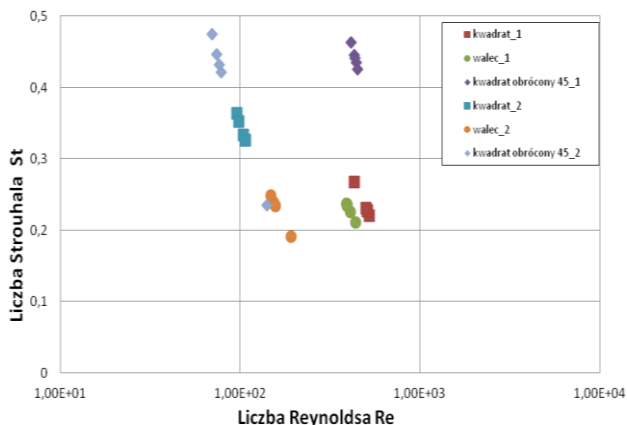
Biorąc pod uwagę wartości częstotliwości powstawania wirów oraz prędkości przepływu płynu i wymiaru charakterystycznego dla przeszkody wyznaczono liczby Strouhala (wzór 1). Na podstawie właściwości parametrów fizycznych i prędkości przepływu wyznaczono również charakterystykę przepływu płynu opływających badane sondy w analizowanym obszarze dla dwóch zakresach przepływu:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (2)$$

gdzie: d – wymiar charakterystyczny dla przeszkody [m], w – prędkość przepływającego płynu [m/s], Re – liczba Reynoldsa, ν – współczynnik kinematyczny lepkości płynu [m²/s].

Na podstawie uzyskanych wartości liczb S_T i Re sporządzono charakterystyki zależności dla dwóch różnych badanych profili sond. Na rysunku 19 przedstawiono rozkład uzyskanych wyników eksperymentalnych w zależności $S_T = f(Re)$. Można stwierdzić, że wyniki przeprowadzonych dla 2 różnych zakresów strumieni znacznie się różnią od siebie. Dla pierwszego zakresu ruchu cieczy w tunelu czyli większy strumień miał opływ walca i graniastosłupa czworokątnego. Mają również zbliżony charakter przepływu, oraz częstotliwość generacji wirów za profilem. W przypadku częstotliwości odrywania wirów za profilami jest większy dla opływu o podstawie kwadratu.

Natomiast w drugim zakresie opływ badanych profili sond znacznie uległ zmianie. Opływ sondy o podstawie kwadratu, częstotliwość powstawania wirów i wartość liczby S_T znacznie odbiega do opływu walca. Najbardziej wyróżniającym od pozostałych jest opływ profilu o podstawie kwadratu obróconego pod kątem 45°. Co jest spowodowane tym że wymiar charakterystyczny jest większy od pozostałych profili.

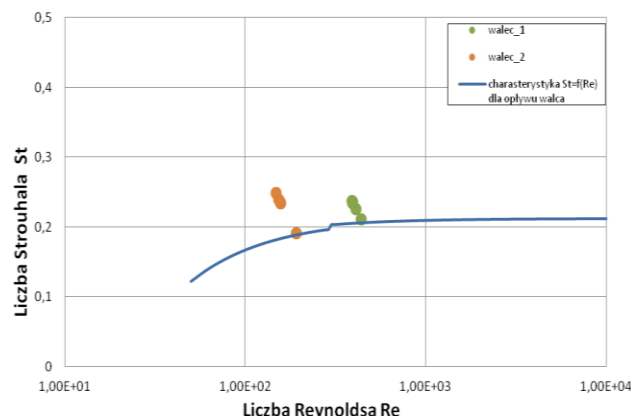


Rys. 19. Wyniki eksperymentalne charakterystyki przepływu płynu zbadanych profili sond

Na rysunku 20 przedstawiono rozkład uzyskanych eksperymentalnych wyników liczby kryterialnej S_T o funkcji Re dla opływu walca. Do charakterystyki dołączono zależność liczby S_T do Re opisaną w literaturze [5] oraz porównano z wynikami doświadczalnymi. Analizując omawiany wykres można stwierdzić, iż uzyskane wartości doświadczalne przy technice anemometrii obrazowej (PIV) są zbliżone do wartości literaturowych zależności $S_T = f(Re)$ dla opływu profilu o kształcie cylindrycznym.

Obliczone wartości liczby Strouhala zależą od prędkości przepływu płynu w zakresie 0,0071 do 0,043 m/s, liczba Strouhala zmienia się w przedziale 0,22 do 0,36 dla opływu profili

o podstawie kwadratu, liczba Strouhala dla cylindra zawiera się w przedziale 0,19 do 0,25, natomiast dla profili o podstawie obróconego kwadratu pod kątem 45° znajduje się w zakresie 0,23 do 0,47.



Rys. 20. Wyniki eksperymentalne opływu walca wraz z charakterystyką literaturową

3. Podsumowanie

Dzięki zastosowaniu metody anemometrii obrazowej uzyskano rozkłady prędkości w otoczeniu analizowanych sond. Przedstawiono rozkłady prędkości w analizowanych obszarach. Określono częstotliwość odrywania wirów i wyrażono ją w postaci liczby podobieństwa Strouhala. Opracowano zależności $S_T = f(Re)$ dla analizowanych profili. Charakterystyka zachowania płynu podczas opływu poszczególnych profili są bardzo zróżnicowane.

Mogą one stanowić silną przesłankę do wykorzystania metody PIV do dalszych badań doświadczalnych, nad innymi kształtami sond.

Literatura

- [1] Kulińczak A., Pankanin G.: Modelowanie ścieżki wirowej von Karmana przy użyciu pakietu ANSYS FLUENT. Przegląd Elektrotechniczny 90(8), 2014, 195–198.
- [2] Suchecki W., Alabrudziński S.: Metoda korekty wykresów pól prędkości w cyfrowej anemometrii obrazowej. Inż. Ap. Chem. 42(3), 2003, 13–20.
- [3] von Karman T.: Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erzeugt. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math. Phys. Klass., 1911, 509–517.
- [4] www.pivlab.blogspot.com [14.04.2016].
- [5] Yamasaki H., Rubin M.: The vortex flowmeter. Flow its Measurement and Control in Science and Industry. USA 1974, 975–985.
- [6] Zając D., Ulbrich R.: Nieinwazyjne metody badań przepływów dwufazowych gaz-ciecz. Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, Opole 2005.
- [7] Zgolak P.: Koncepcja badań wizualizacji przepływu cieczy newtonowskich i nienewtonowskich. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej 102, 2013, 191–194.
- [8] Zgolak P.: Wizualizacja przepływu cieczy w kanale metodą PIV. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej 105, 2015, 233–236.

Mgr inż. Piotr Zgolak

e-mail: p.zgolak@doktorant.po.edu.pl

Doktorant Politechniki Opolskiej, Wydziału Mechanicznego, Katedry Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej zajmujący się badaniami w dziedzinie Mechaniki płynów oraz przetwarzanie obrazu.



otrzymano/received: 20.06.2016

przyjęto do druku/accepted: 22.11.2017